การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT สำหรับการจัดทำบัญชีน้ำในลุ่มน้ำเซโดน สปป.ลาว

Application of SWAT model for Water Accounting in Sedone River Basin, Lao PDR

วิโรจน์ กิมาลา[1] และ เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย[1]*

Viloth Kimala[1] and Ekasit Kositsakulchai[1*]

ABSTRACT

This research demonstrated the application of SWAT model for water accounting analysis in Sedone River Basin in Lao PDR, where there was the drainage area of 7,217 km^2. The available data from 2001 to 2010 were selected. Water accounting analysis was based on three case studies: without irrigation, current irrigation and full potential irrigation. The analysis results were summarized on an annual basis and divided into sub-areas along the River. The SWAT model was applicable for the analysis of water balance components at the hydrologic response unit (HRU) scale of sub-watershed and the application of GIS could enhance the result visualization. The SWAT model simulated water balance components on daily time step, but recorded results of each HRU as an annual mean. Therefore it was limiting for the analysis of accounting water on monthly or seasonal basis. The result of water accounting analysis demonstrated the net inflow into the basin of about 15,600 MCM annually, with depleted water from evapotranspiration of about 37% of the inflow and outflow to stream of about 63%. Finally, water accounting analysis showed the current status of the Sedon River Basin to be an open basin, which implied that there was adequate water resources for further usages.

Keywords: SWAT model, Water accounting, Sedone River Basin, Lao PDR.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT สำหรับการวิเคราะห์บัญชีน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเซโดน สปป ลาว ซึ่งมีพื้นที่ลุ่มน้ำ 7,217 ตร.กม. โดยใช้ข้อมูล 10 ปี (ค.ศ. 2001 ถึง ค.ศ. 2010) แบ่งการวิเคราะห์บัญชีน้ำ 3 กรณีศึกษา ประกอบด้วย การใช้น้ำฝนอย่างเดียว การใช้น้ำชลประทานในพื้นที่ปลูกข้าวตามสภาพปัจจุบัน การใช้น้ำชลประทานเต็มพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดในลุ่มน้ำ ผลลัพธ์สรุปผลเป็นรายปีทั้งลุ่มน้ำ และ เป็นพื้นที่ย่อย แบบจำลอง SWAT สามารถแยกองค์ประกอบของสมดุลน้ำได้ละเอียดถึงระดับ HRUs ของลุ่มน้ำย่อย และการใช้แบบจำลองร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์สามารถแสดงผลลัพธ์ได้อย่างชัดเจนและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

[1*] ห้องปฏิบัติการวิจัยการติดตามและการจัดการทางอุทกวิทยาเกษตรด้วยระบบอัจฉริยะ (INAM) ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

INtelligent Agro-hydrological Monitoring and Management Research Laboratory (INAM), Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

[*]Corresponding author: Tel. 0 - 3435 - 1897, Fax. 0 - 3435 - 2053, E-mail address: fengesk@ku.ac.th

แต่ด้วยแบบจำลองจัดเก็บผลของการจำลองเป็นค่าเฉลี่ยรายปี จึงมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์บัญชีน้ำในแบบรายเดือนและแบบรายฤดูกาล นอกจากนี้ ยังได้จำแนกปริมาณน้ำตามการใช้น้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำจากปริมาณน้ำไหลเข้าพื้นที่ทั้งหมด 15,600 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี มีปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากลุ่มน้ำโดยการใช้น้ำของพืช 37% และปริมาณน้ำที่ไหลออกสู่ลำน้ำคิดเป็น 63% เทียบกับปริมาณน้ำไหลเข้า ผลการวิเคราะห์บัญชีน้ำสรุปได้ว่าลุ่มน้ำเซโดนในสภาพปัจจุบันอยู่ในสถานะเปิด (an open basin) กล่าวคือมีทรัพยากรน้ำเหลือสำหรับการใช้น้ำที่เพิ่มขึ้นได้อีก

คำสำคัญ: แบบจำลอง SWAT การจัดทำบัญชีน้ำ ลุ่มน้ำเซโดน

คำนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด อีกทั้งแหล่งที่มาเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางธรรมชาติซึ่งไม่แน่นอนและคาดการณ์ได้ยาก งานด้านการจัดสรรน้ำเป็นงานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในจัดการน้ำโดยเฉพาะการขาดแคลนน้ำในฤดูช่วงแล้ง การจัดสรรน้ำให้เพียงพอกับความต้องการด้านปริมาณเป็นเรื่องที่ทำได้ยากนอกจากนี้ความต้องการน้ำยังแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ การจัดการน้ำจึงนับได้ว่าเป็นงานที่มีความยุ่งยาก และซับซ้อน

สปป ลาว กำหนดนโยบายการพัฒนาเศรษฐกิจของชาติโดยถือเอาเกษตรกรรมเป็นพื้นฐานโครงร่างการพัฒนาเศรษฐกิจ ซึ่งปัจจัยหลักของการผลิตทางด้านเกษตรกรรมโดยการเพิ่มพื้นที่ชลประทานในลุ่มน้ำต่างๆ ของประเทศ (กรมชลประทาน, 2009) ลุ่มน้ำเซโดนเป็นพื้นที่สำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของภาคใต้ประเทศ แต่ด้วยสภาพปัจจุบัน ลุ่มน้ำมีแนวโน้มการเพิ่มปริมาณความต้องการใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ ที่สูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นด้านเกษตรกรรม อุปโภค-บริโภค และอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากการขยายตัวของชุมชน และจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณน้ำต้นทุนมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยแนวทางในการบริหารจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้ปริมาณน้ำที่มีอยู่เพียงพอกับความต้องการมากที่สุด

ปัจจุบันทั่วโลกได้ตระหนักถึงปัญหาทรัพยากรน้ำจึงได้มีความพยายามที่จะหาแนวทางในการบริหารและจัดการทรัพยากรน้ำเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและเหมาะกับแต่ละสภาพพื้นที่ การจัดทำบัญชีน้ำ (water accounting) (Molden, 1997) เป็นวิธีการหนึ่งในการประเมินการบริหารจัดการน้ำทั้งระบบ และเป็นเครื่องมือที่ช่วยทำความเข้าใจถึงกิจกรรมการใช้น้ำในด้านต่างๆ เพื่อนำไปสู่กระบวนการปรับปรุงการใช้น้ำในแต่ละกลุ่มกิจกรรมต่างๆ ให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น (เอกสิทธิ์และบัญชา, 2545) ปัจจุบันได้มีการนำหลักการของบัญชีน้ำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ต่างๆ เช่น ไชยวัฒน์และเอกสิทธิ์ (2548), ไชยวัฒน์ (2548), วิศิษฏ์และคณะ (2552), วิโรจน์และเอกสิทธิ์ (2556), Molden *et al.* (2000), Taesombut *et al.* (2002), Peranginaangin *et al*. (2003), Shilpaker (2003)

ปริมาณน้ำเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญในการวางแผน และการจัดการทรัพยากรในด้านต่างๆ เช่นด้านการเกษตร อุปโภค-บริโภค และอุตสาหกรรม โดยปัจจุบันได้มีการนำใช้แบบจำลองอุทกวิทยาในการประเมินปริมาณน้ำกันอย่างแผ่หลาย แต่ส่วนใหญ่จะใช้ของแบบจำลองในกลุ่มของ lumped-parameter model ในการประเมินปริมาณน้ำ แต่สำหรับการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลอง SWAT ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทการกระจายพารามิเตอร์ (distributed-parameter model) ที่มีความสามารถจำลองพื้นที่ที่มีความซับซ้อนทางด้านอุทกวิทยาได้ดี (Arnold and Fohrer, 2005; Behera and Panda, 2006; Gassman *et al*., 2007) โดยแบบจำลองได้ถูกนำใช้สำหรับการประเมินปริมาณน้ำของลำน้ำในพื้นที่ต่างๆ ตามสภาพทาง

ภูมิศาสตร์ และเงื่อนไข ซึ่งมีวิธีปฏิบัติที่แตกต่างกัน (วิโรจน์และเอกสิทธิ์, 2555; สุวิทย์และสุภักดิ์, 2556; Hoanh *et al.,* 2010; Ayana *et al.,* 2012)

สำหรับงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT ในการวิเคราะห์บัญชีน้ำของลุ่มน้ำเซโดน สปป.ลาว โดยเป็นการวิเคราะห์แยกองค์ประกอบต่าง ๆ ตามหลักการของสมดุลน้ำในระดับลุ่มน้ำย่อย ซึ่งวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลเข้า และไหลออกจากขอบเขตที่พิจารณา นอกจากนี้ยัง จำแนกปริมาณน้ำตามลักษณะของการใช้น้ำในพื้นที่ตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างของลุ่มน้ำเซโดน

อุปกรณ์ และวิธีการ

ขอบเขตของการศึกษา

ลุ่มน้ำเซโดนตั้งอยู่ระหว่าง ละติจูด 15° 23′ 00″ ถึง 16° 28′ 00″ เหนือ และลองจิจูด 105° 35′ 00″ ถึง 106° 40′ 00″ ตะวันออก มีพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด 7,217 ตร.กม. ส่วนใหญ่ครอบคลุมจังหวัดสาละวันคิดเป็น 72% ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ครอบคลุมจังหวัดจำปาสัก 18% และจังหวัดเซกอง 9.7% (Figure 1) เซโดนเป็นลำน้ำสายหลักของเขตลุ่มน้ำโดยมีความยาวทั้งหมดเท่ากับ 228 กม. มีต้นน้ำที่อยู่บริเวณเมืองท่าแตง จังหวัดเซกอง ไหลไปรวมกับแม่น้ำโขงที่เมืองปากเซ จังหวัดจำปาสัก

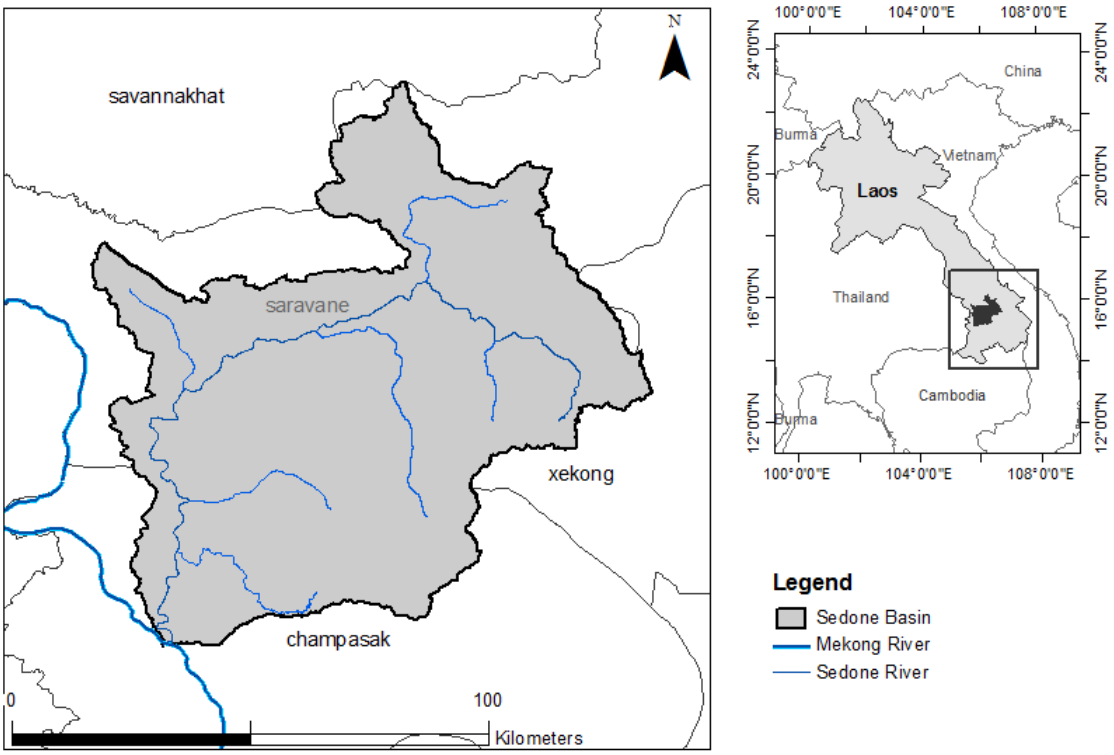

Figure 1 Location of Sedone River Basin, Lao PDR

สภาพภูมิประเทศของลุ่มน้ำ โดยทั่วไปมีสภาพเป็นเทือกเขาสลับซับซ้อนปกคลุมด้วยป่าไม้ และมีที่ราบลุ่มตามแหล่งชุมชนโดยมีค่าระดับความสูงเฉลี่ยประมาณ 700 ม. จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ซึ่งมียอดเขาสูงสุดที่ระดับความสูง 2,000 ม. อยู่บริเวณเขตเมืองปากช่อง และต่ำสุดที่ระดับความสูง 100 ม. จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ที่อยู่บริเวณเมืองปากเซ จังหวัดจำปาสัก ดังแสดงใน Figure 2

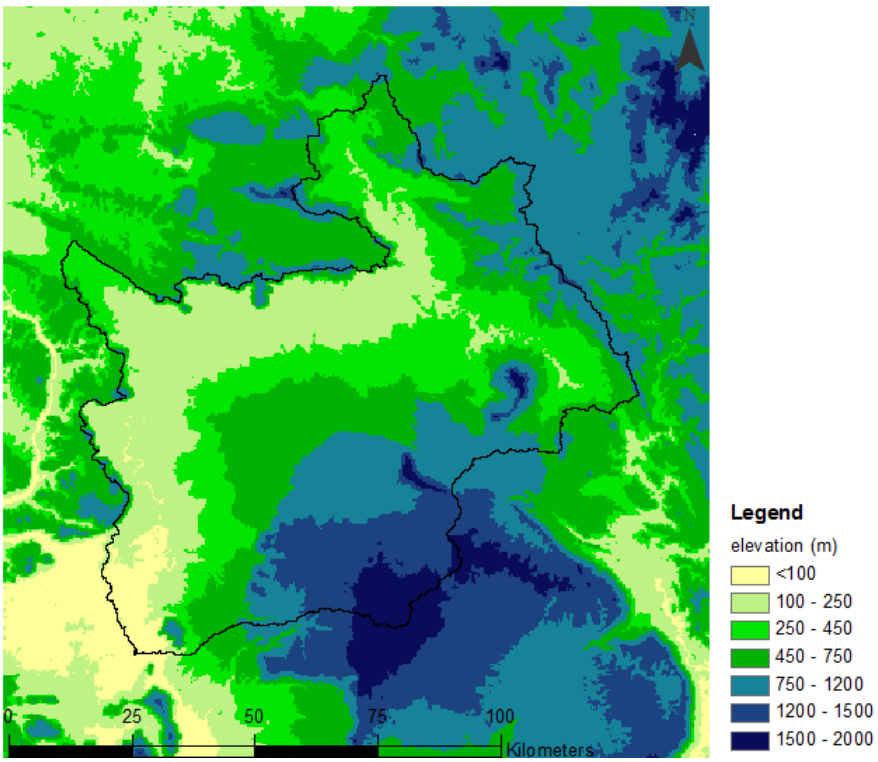

Figure 2 Elevation of Sedone River Basin

สภาพภูมิอากาศของลุ่มน้ำโดยทั่วไปร้อนชื้น ฤดูฝนส่วนใหญ่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นยังได้รับอิทธิพลจากพายุดีเปรสชั่นซึ่งมาจากทะเลจีนใต้ทำให้มีฝนตกชุก ปริมาณฝนของพื้นที่ลุ่มน้ำแบ่งออกเป็นสองฤดูอย่างชัดเจนคือ ฤดูฝนเริ่มแต่เดือนเมษายนถึงตุลาคมของปี และฤดูแล้งเริ่มต้นแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคมของปี ในพื้นลุ่มน้ำมีความแตกต่างของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีในพื้นที่ราบลุ่มอยู่ที่ 1,800 มม. จนถึง 3,500 มม. ในพื้นที่สูง อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนอยู่ระหว่าง 24-28^{o}C ดังแสดงใน Figure 3

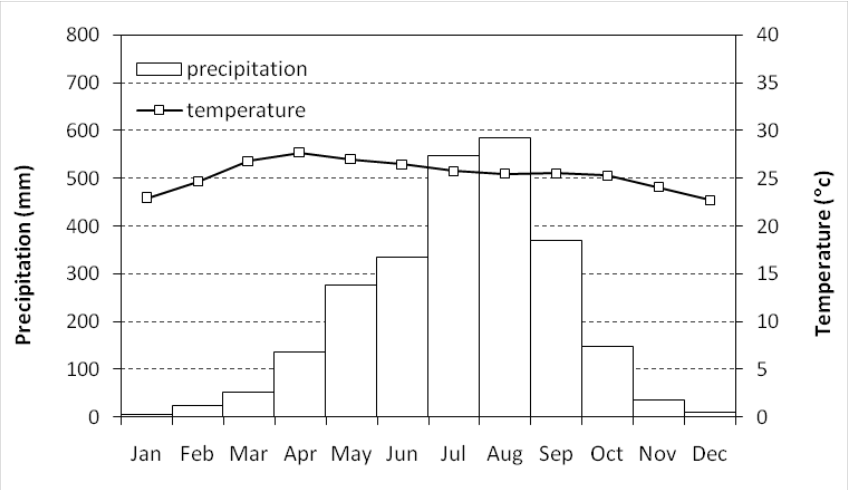

Figure 3 Monthly mean temperature and precipitation in Sedone River Basin

การจัดทำบัญชีน้ำ

การจัดทำบัญชีน้ำ (water accounting) เป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดยสถาบันการจัดการน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute, IWMI) มีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจถึงกิจกรรมการใช้น้ำในด้านต่างๆ และเพื่อให้ทราบถึงแนวทางที่สามารถปรับปรุงการใช้น้ำในแต่ละกลุ่มกิจกรรมต่างๆ ให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ทราบถึงผลิตผลที่ได้จากน้ำในภาพรวม ทั้งนี้การจัดทำบัญชีน้ำจะพิจารณาจำแนกกิจกรรมการใช้น้ำต่างๆ โดยผนวกแนวความคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์ และทางการจัดการน้ำ เช่น สิทธิการใช้น้ำ ชนิดของผลประโยชน์จากการใช้น้ำเพิ่มเข้ามาวิเคราะห์ (เอกสิทธิ์และบัญชา, 2545)

หลักการของการจัดทำบัญชีน้ำ

Molden (1997) ได้เสนอการจัดการน้ำโดยใช้วิธีการจัดทำบัญชีน้ำ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาการใช้น้ำ การสูญหาย และผลผลิตจากน้ำในหน่วยที่พิจารณา ซึ่งการจัดทำบัญชีน้ำมีหลักการพื้นฐานคล้ายกับการทำสมดุลของน้ำ (water balance) ซึ่งพิจารณาถึงปริมาณน้ำไหลเข้า (inflow) ปริมาณน้ำไหลออก (outflow) จากขอบเขตพื้นที่พิจารณา (domain) การจัดทำบัญชีน้ำสามารถวิเคราะห์ได้ 3 ระดับ ได้แก่ ระดับลุ่มน้ำ (basin level) ระดับโครงการชลประทาน (irrigation service level) และระดับแปลงเพาะปลูก (field level) โดยมีสมการสมดุลน้ำดังนี้

$$\Delta S = \Sigma I - \Sigma O \qquad (1)$$

โดยที่ ΔS คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตร
ΣI คือผลรวมปริมาณน้ำไหลเข้า
ΣO คือผลรวมปริมาณน้ำไหลออก

การทำบัญชีน้ำต่างจากการทำสมดุลน้ำ ซึ่งการทำบัญชีน้ำจะพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลออกจากระบบ (depletion และ outflow) โดยจำแนกตามกิจกรรมการใช้น้ำในด้านต่างๆ โดยรายละเอียดนิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องการทำบัญชีน้ำโดยรายละเอียดดูได้จากบทความวิจัยของเอกสิทธิ์และบัญชา (2545)

ข้อมูลที่ใช้

DEM (Digital Elevation Model) เป็นแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลขจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบแรสเตอร์ (raster) ซึ่งใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับแบบจำลองอุทกวิทยา ข้อมูล DEM ที่ใช้เป็นข้อมูลได้จากกรมแผนที่ของ สปป ลาว pixel มีขนาด 50x50 ม. ระบบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือ WGS 1984 UTM Zone 48N

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (climate data) เป็นข้อมูลที่เก็บบันทึกเป็นตัวเลขชนิดรายวันเริ่มต้นปี ค.ศ. 1996 ถึงปี ค.ศ. 2010 โดยรวบรวมจากกรมอุตุนิยมวิทยา และอุทกวิทยาของ สปป ลาว ประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ความเร็วลม และ รังสีดวงอาทิตย์ ข้อมูลรวบรวมจากสถานีตรวจอากาศ 4 สถานี คือ สถานีเมืองปากเซ สถานีเมืองปากช่อง สถานีเมืองสาละวัน และสถานีเมืองคงเซโดน ดังแสดงใน Table 1 และ Figure 4

Table 1 Location of climate stations and annual rainfall in Sedone River Basin

No	Station name	Location	Elevation (m)	Rainfall (mm year^{-1})
1	Khongsedone	N 15° 34' E 105° 48'	122	1,800
2	Pakse	N 15° 07' E 105° 47'	102	2,000
3	Paksong	N 15° 11' E 106° 14'	1,200	3,500
4	Salavane	N 15° 43' E 106° 27'	168	1,900

Figure 4 Location of climate stations and observed runoff in Sedone River Basin

ข้อมูลปริมาณน้ำท่า (observed runoff data) ของลุ่มน้ำมีเพียงสถานี Suvannakilli ซึ่งตั้งอยู่ตอนล่างของลุ่มน้ำ (ละติจูด 15° 23′ 00″ เหนือ และลองจิจูด 105° 49′ 00″ ตะวันออก) ข้อมูลน้ำท่าเป็นข้อมูลรายวันระหว่างปี ค.ศ. 1996 ถึงปี ค.ศ. 2010 จากกรมอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยาของ สปป ลาว

ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (land-use data) เป็นข้อมูลของปี 2008 โดยได้จากกระทรวงเกษตรและป่าไม้ของ สปป ลาว (Figure 5) ส่วนใหญ่ 70% เป็นพื้นที่ป่าไม้ เป็นพื้นที่เกษตรกรรมประมาณ 30% โดยการใช้ที่ดิน ประกอบด้วย ป่าโคก (dipterocarp forest) มีพื้นที่ประมาณ 267,900 เฮกตาร์ ป่าดิบแล้ง (evergreen forest) ประมาณ 226,700 เฮกตาร์ พื้นที่นา (rice paddy) ประมาณ 124,800 เฮกตาร์ พื้นที่เกษตร (agricultural plantation) ประมาณ 91,100 เฮกตาร์ และ พื้นที่อื่นๆ ได้แก่ พื้นที่โล่งและหิน (barren land) ทุ่งหญ้า (grassland) พื้นที่ปลูกสร้าง (urban or built-up area) พื้นที่น้ำ (water bodies)

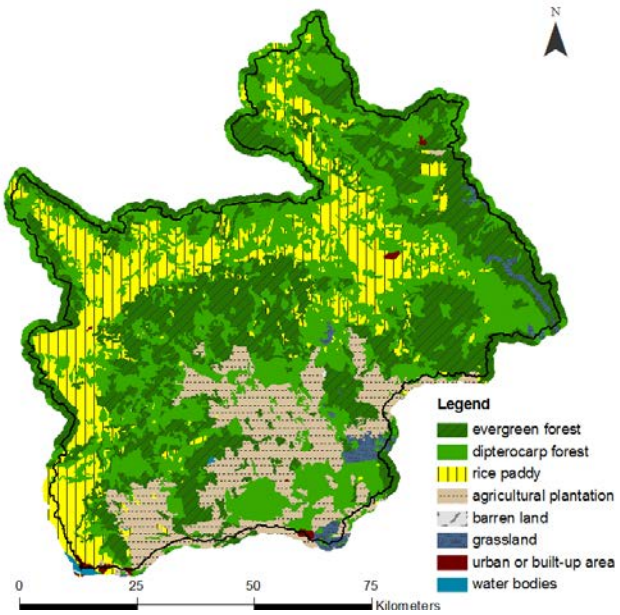

Figure 5 Land use map of Sedone River Basin

ข้อมูลดิน (soil data) ประกอบด้วย ดินร่วนเหนียว (clay loam) มีพื้นที่ 299,500 เฮกตาร์ ประมาณ 41% ดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีพื้นที่ 244,700 เฮกตาร์ ประมาณ 40% ดินร่วน (loam) มีพื้นที่ 87 เฮกตาร์ ประมาณ 12% ดินทรายปนดินร่วน (loamy sand) มีพื้นที่ 57,700 เฮกตาร์ ประมาณ 8% และ ดินเหนียว (clay) มีพื้นที่ 32,400 เฮกตาร์ ประมาณ 4% ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากแหล่งข้อมูลของกระทรวงเกษตรและป่าไม้ของ สปป ลาว ดังแสดงใน Figure 6

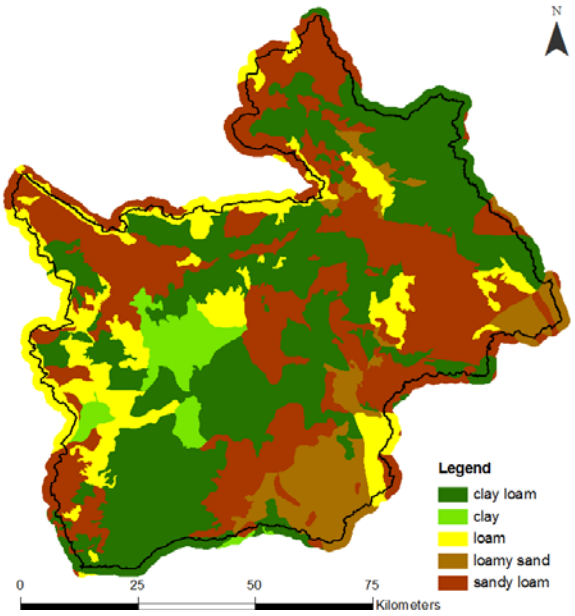

Figure 6 Soil map of Sedone River Basin

ข้อมูลพื้นที่ชลประทานของลุ่มน้ำเซโดน เป็นข้อมูลที่เก็บบันทึกเป็นตัวเลขในเขตพื้นที่ปลูกข้าว โดยลุ่มน้ำมีพื้นที่ชลประทานทั้งหมดประมาณ 14,000 เฮกตาร์ โดยที่ จังหวัดสาละวัน มีพื้นที่ประมาณ 11,450 เฮกตาร์ และ จังหวัดจำปาสักมีพื้นที่ประมาณ 2,600 เฮกตาร์ เป็นข้อมูลที่ได้จากแขนงชลประทานของจังหวัดสาละวัน และจำปาสัก เป็นข้อมูลปี 2012

การวิเคราะห์บัญชีน้ำด้วยผลของแบบจำลอง SWAT

แบบจำลอง SWAT ใช้ข้อมูลที่สำคัญประกอบด้วย ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (land-use data) ข้อมูลดิน (soil data) และข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (climate data) ของลุ่มน้ำเซโดน โดยแบบจำลองจะทำการคำนวณปริมาณการไหลจากหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units: HRUs) ของแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยตามลำดับจากนั้นแบบจำลองจะทำการการเลียนแบบ (model simulate) โดยมีการ calibration and validation ด้วยข้อมูล observation runoff ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวต่อแบบจำลอง (parameter sensitivity analysis) และทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วย coefficient of determination (R^2) และ Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSE) โดยรายละเอียดเพิ่มเติมดูได้ที่ Viloth and Ekasit (2012)

งานวิจัยนี้ จะพิจารณาผลจากแบบจำลอง SWAT เฉพาะข้อมูลความสัมพันธ์น้ำฝน-น้ำท่าเท่านั้น โดยประมวลผลเป็นรายวัน เริ่มต้นจาก วันที่ 1 เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2001 ถึง วันที่ 31 เดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2010 รวมระยะเวลา 10 ปี แบบจำลองให้ผลสรุปเป็นรายเดือน จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์สมดุลน้ำ และวิเคราะห์บัญชีน้ำ การวิเคราะห์บัญชีน้ำในลุ่มน้ำเซโดนเป็นการวิเคราะห์ผลเฉลี่ยรายปี โดยการจำลองพิจารณาเป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่หนึ่ง การใช้น้ำฝนอย่างเดียว (without irrigation) เป็นการวิเคราะห์บัญชีน้ำโดยใช้ผลที่ได้จาก แบบจำลองที่คำนวณค่าต่างๆ จากข้อมูลพื้นฐานที่นำเข้า ซึ่งเป็นการใช้ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ในสภาพที่ไม่ได้มีการตั้งค่าให้แบบจำลองมีการดึงน้ำจากลำน้ำมาใช้ในพื้นที่ปลูกข้าว

กรณีที่สอง มีการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่ปลูกข้าวตามสภาพปัจจุบัน (current irrigation) เป็นการวิเคราะห์บัญชีน้ำโดยใช้ผลที่ได้จากแบบจำลอง ด้วยการตั้งค่าให้แบบจำลองมีการดึงน้ำจากลำน้ำมาใช้เพิ่มในพื้นที่ปลูกข้าวในฤดูแล้ง โดยใช้ข้อมูลจากพื้นที่ชลประทานจริงของลุ่มน้ำเซโดน

กรณีที่สาม มีการใช้น้ำชลประทานเต็มพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดในลุ่มน้ำเซโดน (full potential irrigation) เป็นการวิเคราะห์บัญชีน้ำจากผลของแบบจำลอง โดยให้แบบจำลองมีการดึงน้ำจากลำน้ำมาใช้เพิ่มในพื้นที่ปลูกข้าวในฤดูแล้ง ซึ่งเป็นการจำลองในสถานการณ์ที่มีการเพิ่มพื้นที่ชลประทานในพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดของลุ่มน้ำเซโดน

องค์ประกอบในการวิเคราะห์

การจัดทำบัญชีน้ำครั้งนี้ได้กำหนดหน่วยพิจารณา (domain) เป็นระดับลุ่มน้ำ และแบ่งการวิเคราะห์บัญชีน้ำของลุ่มน้ำเซโดน เป็นสามส่วน ประกอบด้วย พื้นที่ลุ่มน้ำเซโดนตอนบน (upper sedone) พื้นที่ตอนกลาง (middle sedone) และพื้นที่ตอนล่าง (lower sedone) โดยการแบ่งพื้นที่ได้พิจารณาตามตำแหน่งเมืองที่มีประชากรอยู่อย่างหนาแน่น คือ เมืองสาละวัน เมืองคงเซโดน และเมืองปากเซ ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ได้ทำการประเมินองค์ประกอบของบัญชีน้ำที่ละส่วนและจัดทำบัญชีน้ำ

ปริมาณน้ำฝน (rainfall) เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำที่ไหลเข้า (inflow) สู่หน่วยที่พิจารณา

การประเมินองค์ประกอบอย่างแม่นยำนับได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของการจัดทำบัญชีน้ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ผลจากการประเมินปริมาณน้ำฝนจากแบบจำลอง SWAT

ปริมาณน้ำที่สูญหายไป (depletion water) พิจารณาการใช้น้ำของพืชโดยการคายระเหย (evapotranspiration) โดยแบ่งเป็นสองส่วน ประกอบด้วย น้ำที่สูญหายไปเพื่อก่อให้เกิดผลผลิตตามความต้องการของมนุษย์ (processed depletion) และน้ำที่สูญหายไปที่ไม่ก่อให้เกิดผลผลิตตามต้องการของมนุษย์ (non-processed depletion) โดยรายละเอียดนิยามดูได้ที่ เอกสิทธิ์และบัญชา (2545) ปริมาณน้ำที่สูญหายไปที่ได้เป็นผลการประเมินจากแบบจำลอง

ปริมาณการไหลในลำน้ำ (stremflow) เป็นปริมาณการไหลออกจากลำน้ำสู่จุดออกที่แม่น้ำโขง ซึ่งวิเคราะห์ผลที่ได้โดยการวิเคราะห์สมดุลน้ำของแบบจำลอง

ปริมาณน้ำเพื่อรักษาสมดุลนิเวศในลุ่มน้ำประเมินจากองค์การวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมของ สปป ลาว ได้กำหนดปริมาณน้ำต่ำสุดที่ 15 ลบ.ม.ต่อวินาที

การประเมินดัชนีของบัญชีน้ำ (indicators) เป็นการสรุปผลของการจัดทำบัญชีน้ำโดยหาอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่สูญหายไป (depletion fraction, DF) และอัตราส่วนของน้ำที่ถูกใช้ (process fraction, PF)ตามสมการที่แสดงไว้ดังนี้

$$DF_{net} = \frac{\text{Depletion water}}{\text{Net inflow}} \quad (2)$$

$$DF_{gross} = \frac{\text{Depletion water}}{\text{Gross inflow}} \quad (3)$$

$$DF_{available} = \frac{\text{Depletion water}}{\text{Available water}} \quad (4)$$

$$PF_{depletion} = \frac{\text{Process depletion}}{\text{Total depletion}} \quad (5)$$

$$PF_{available} = \frac{\text{Process depletion}}{\text{Available water}} \quad (6)$$

โดยที่ gross inflow คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าทั้งหมด, net inflow คือ ปริมาณน้ำไหลเข้าสุทธิ, available water คือ ปริมาณน้ำที่นำมาใช้ได้, total depletion คือปริมาณน้ำที่สูญหายไป

ผลและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์สมดุลน้ำ (water balance)

การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลจากการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลอง SWAT ของ 3 กรณีศึกษา โดยใช้ข้อมูล 10 ปีระหว่างปี ค.ศ. 2001 ถึงปี ค.ศ. 2010 และทำการสรุปผลเป็นค่าเฉลี่ยรายปี ผลการจำลองพบว่าแบบจำลองได้แยกองค์ประกอบของสมดุลน้ำแต่ละลุ่มน้ำย่อยออกเป็นสองส่วนหลัก คือ ปริมาณน้ำเข้าพื้นที่ ซึ่งพิจารณาปริมาณฝน (rainfall) ดังแสดงใน Figure 7 ส่วนที่สองเป็นปริมาณน้ำส่วนที่ออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่สูญหายไปจาก การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) ดังแสดงใน Figure 8 และปริมาณน้ำที่ไหลออกสู่ลำน้ำ (outflow) ดังแสดงใน Figure 9 ซึ่งมีผลที่ได้ดังนี้

1.1 กรณีพิจารณาการใช้น้ำฝนอย่างเดียว (without irrigation) ผลจากการวิเคราะห์พบว่าปริมาณฝนเป็นที่มาของปริมาณน้ำที่เข้าพื้นที่ลุ่มน้ำเซโดนทั้งหมด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2,150 มม. โดยปริมาณน้ำส่วนที่ไหลออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากการคายระเหยน้ำจากลุ่มน้ำย่อยมีปริมาณน้ำเฉลี่ยประมาณ 790 มม. คิดเป็น 37% เทียบกับปริมาณน้ำที่สูญ

หายไปในลุ่มน้ำ และปริมาณน้ำที่ไหลออกสู่ลำน้ำจากพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยมีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 1,360 มม. โดยคิดเป็น 63% ของปริมาณน้ำที่สูญหายไปทั้งหมดของลุ่มน้ำ

1.2 กรณีพิจารณาให้มีการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่ปลูกข้าวสภาพปัจจุบัน (current irrigation) ผลการวิเคราะห์พบว่า ได้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากการคายระเหยน้ำของลุ่มน้ำย่อย เนื่องจากแบบจำลองได้ทำการประเมินปริมาณการใช้น้ำของพืชเพิ่มในพื้นที่มีการใช้น้ำชลประทานในช่วงแล้ง โดยมีปริมาณการคายระเหยน้ำเฉลี่ยประมาณ 800 มม. คิดเป็น 38% เทียบกับปริมาณน้ำที่สูญหายไป และส่วนของปริมาณน้ำที่ไหลออกสู่ลำน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยมีปริมาณน้ำที่ลดลงจากเดิม โดยมีปริมาณน้ำเฉลี่ยประมาณ 1,350 มม. คิดเป็น 62% ของปริมาณน้ำที่สูญหายไปทั้งหมดจากลุ่มน้ำ

1.3 กรณีพิจารณาให้มีการใช้น้ำชลประทานเต็มพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดในลุ่มน้ำเซโดน (full potential irrigation) ผลการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากการคายระเหยน้ำจากลุ่มน้ำย่อยเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากการคายระเหยน้ำเฉลี่ยประมาณ 840 มม. คิดเป็น 40% เทียบกับปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากลุ่มน้ำ และเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีการลดลงของปริมาณน้ำที่ไหลออกสู่ลำน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย โดยมีปริมาณน้ำเฉลี่ยประมาณ 1,310 มม. คิดเป็น 60% ของปริมาณน้ำที่สูญหายไปทั้งหมดจากลุ่มน้ำ

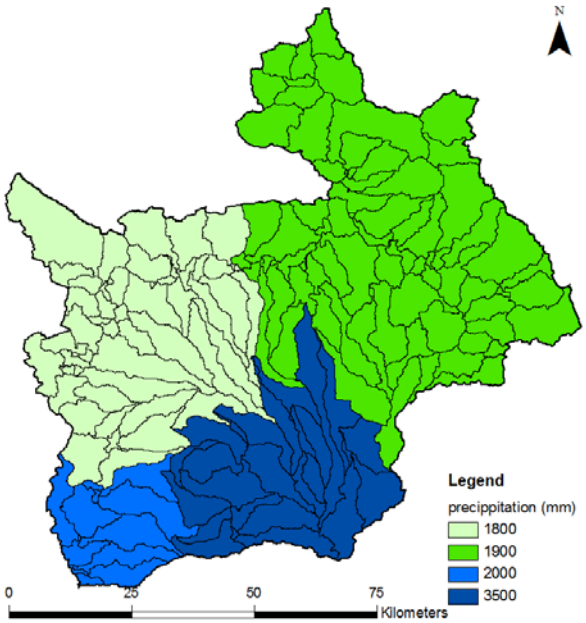

Figure 7 Precipitation in sub-basin

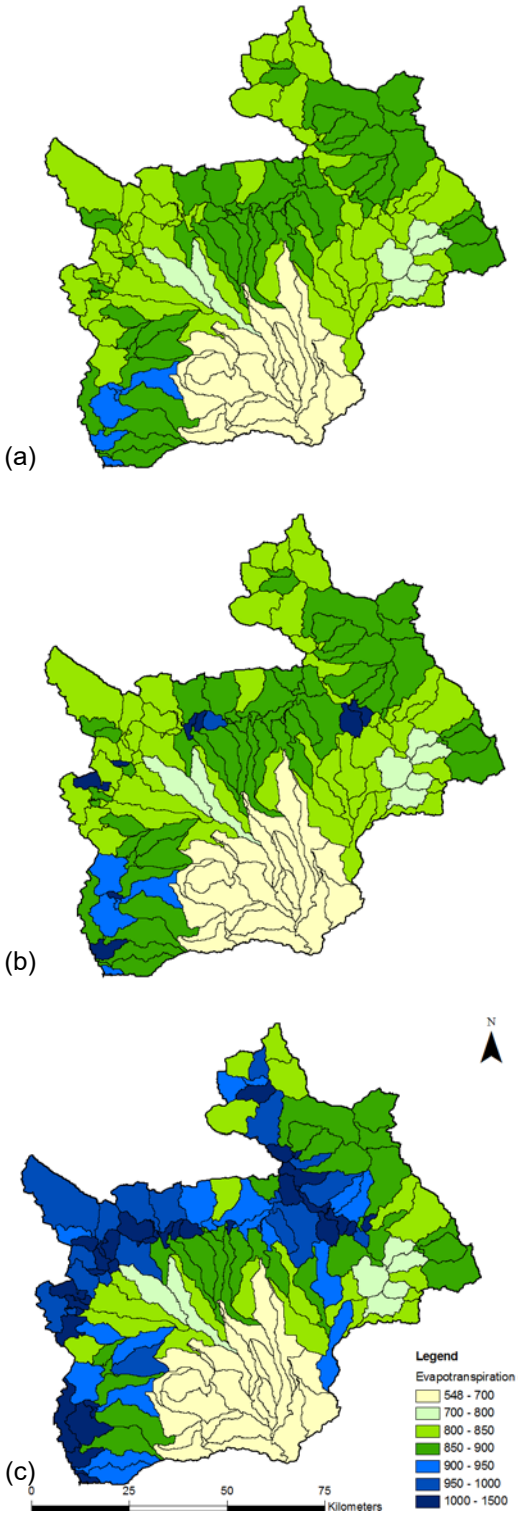

Figure 8 Evapotranspiration in sub-basin (a) without irrigation (b) current irrigation (c) full potential irrigation

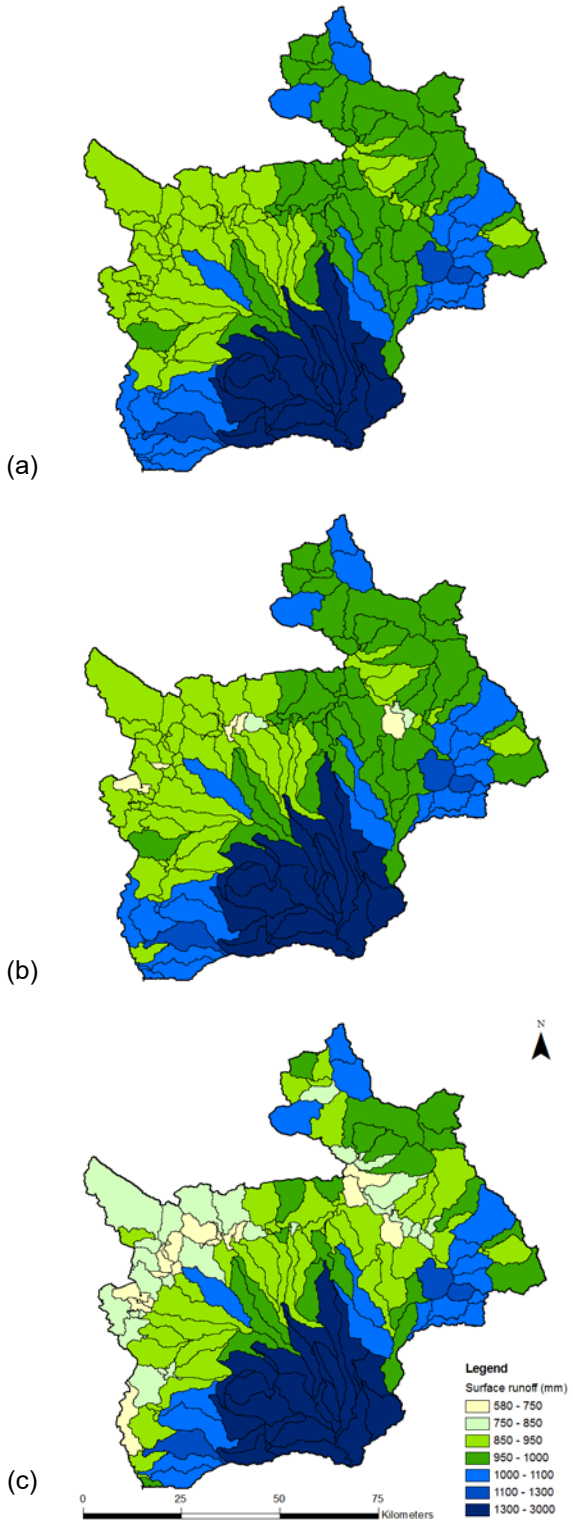

Figure 9 Outflow in sub-basin (a) without irrigation (b) current irrigation (c) full potential irrigation

2. การวิเคราะห์บัญชีน้ำ (water accounting)

การวิเคราะห์บัญชีน้ำของลุ่มน้ำเซโดนใช้ข้อมูล 10 ปีระหว่างปี ค.ศ. 2001 ถึงปี ค.ศ. 2010 เป็นการวิเคราะห์บัญชีน้ำรายปีทั้งลุ่มน้ำของสามกรณีศึกษาดังแสดงใน Table 2 ส่วนการวิเคราะห์บัญชีน้ำรายปีของลุ่มน้ำย่อย แสดงเฉพาะกรณีพิจารณามีการดึงน้ำจากลำน้ำมาใช้ในพื้นที่ชลประทานสภาพปัจจุบัน ดังแสดงใน Table 3 และ Figure 10

2.1 กรณีพิจารณาการใช้น้ำฝนอย่างเดียว (without irrigation) ผลจากการวิเคราะห์บัญชีน้ำของลุ่มน้ำเซโดน พบว่าปริมาณฝนเป็นที่มาของน้ำเข้าพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดซึ่งมีค่าประมาณ 15,600 ล้าน ลบ.ม. โดยปริมาณส่วนที่ออกจากพื้นที่ซึ่งประกอบด้วยปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากลุ่มน้ำ (depletion water) มีปริมาณน้ำ 5,730 ล้าน ลบ.ม. โดยแยกได้เป็น ปริมาณน้ำที่สูญหายไปโดยก่อให้เกิดผลผลิตตามความต้องการของมนุษย์ (processed depletion) มีปริมาณน้ำ 1,580 ล้าน ลบ.ม. หรือเท่ากับ 27% ของปริมาณน้ำที่สูญหายไป ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่เป็นปริมาณการคายระเหยน้ำของป่าไม้ เนื่องจากพื้นที่ป่าไม้ครอบคลุมประมาณ 70% ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ในส่วน ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากลุ่มน้ำนั้น มีปริมาณน้ำ 9,860 ล้าน ลบ.ม. โดยผลการวิเคราะห์ในกรณีพิจารณาใช้น้ำฝนอย่างเดียวพบว่าลุ่มน้ำเซโดนมีการใช้น้ำประมาณ 10% ของปริมาณน้ำที่นำมาใช้ได้ (PFavailable)

2.2 กรณีพิจารณาให้มีการใช้น้ำชลประทานเพิ่มในพื้นที่ปลูกข้าวสภาพปัจจุบัน (current irrigation) การวิเคราะห์บัญชีน้ำพบว่า มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากลุ่มน้ำ (depletion water) คิดเป็นปริมาณน้ำ 5,770 ล้าน ลบ.ม. ในส่วนนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่สูญหายไปโดยก่อให้เกิดผลผลิต คิดเป็น 28% ของปริมาณน้ำที่สูญหายไป ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชเพิ่มขึ้นในพื้นที่ชลประทานในลุ่มน้ำ และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากลุ่มน้ำมีปริมาณน้ำที่ลดลงจากเดิมเล็กน้อยเหลือ 9,800 ล้าน ลบ.ม. แสดงให้เห็นว่าการดึงน้ำจากลำน้ำมาใช้เพิ่มในพื้นที่ชลประทานตามสภาพปัจจุบันนั้น มีผลให้ลุ่มน้ำเซโดนมีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

2.3 กรณีพิจารณาให้มีการใช้น้ำชลประทานเต็มพื้นที่ปลูกข้าวทั้งหมดในลุ่มน้ำเซโดน (full potential irrigation) จากผลการวิเคราะห์บัญชีน้ำพบว่าปริมาณของน้ำที่สูญหายไปจากลุ่มน้ำ (depletion water) มีปริมาณน้ำ 6,000 ล้าน ลบ.ม. หรือประมาณ 39% เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำไหลเข้าพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด โดยแยกเป็นปริมาณน้ำที่สูญหายไปโดยก่อให้เกิดผลผลิต มีค่าเท่ากับ 32% เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่สูญหายไป ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณการใช้น้ำที่เพิ่มสูงขึ้นมากหากมีการดึงน้ำจากลำน้ำเซโดนมาใช้ และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากลุ่มน้ำมีปริมาณลดลง เหลือ 9,500 ล้าน ลบ.ม. จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าลุ่มน้ำเซโดนจะมีการใช้น้ำเพิ่มเป็น 13% ของปริมาณน้ำที่สามารถนำมาใช้ได้

การจัดทำบัญชีน้ำโดยแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นส่วน เป็นการพิจารณาความแตกต่างของการใช้น้ำในแต่ละช่วงของลำน้ำ ซึ่งแยกพื้นที่เป็นสามส่วนประกอบด้วย พื้นที่เซโดนตอนบน ตอนกลาง และตอนล่าง ผลการวิเคราะห์กรณีพิจารณามีการดึงน้ำจากลำน้ำมาใช้เพิ่มในพื้นที่ชลประทานสภาพปัจจุบันของลุ่มน้ำเซโดน พบว่ามีการใช้น้ำที่ส่วนลุ่มน้ำตอนบนค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่สามารถนำมาใช้ได้ โดยสังเกตได้จากดัชนี PF(available) มีค่า 0.048 หรือมีการใช้น้ำไป 4.8% ของปริมาณน้ำที่สามารถนำมาใช้ได้ ในส่วนลุ่มน้ำตอนกลาง พบว่าค่าดัชนี PF(available) มีค่า 0.095 กล่าวได้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่นำมาใช้ได้ และส่วนลุ่มน้ำตอนล่าง มีค่าดัชนี PF(available) มีค่า 0.110 ซึ่งมีการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้นอีกของปริมาณน้ำที่นำมาใช้ได้

Table 2 Water accounting of three case studies in Sedone River Basin

Water accounting components	Without irrigation (MCM)	Current irrigation (MCM)	Full potential irrigation (MCM)
Gross inflow			
Precipitation	15,598.13	15,598.13	15,598.13
Net inflow	15,598.13	15,598.13	15,598.13
Depletive use			
Process depletion			
Evapotranspiration	1,586.90	1,627.46	1,944.46
Non-process depletion			
Beneficial (Forest evaporation)	4,148.93	4,148.93	4,148.93
Total depletion	5,735.83	5,776.39	6,093.39
Outflow			
Committed water	500.00	500.00	500.00
Uncommitted outflow	9,359.60	9,309.60	8,992.80
Total outflow	9,859.60	9,809.60	9,492.80
Available water	15,098.13	15,098.13	15,098.13
Indicator			
Depleted fraction (gross)	0.368	0.370	0.391
Depleted fraction (net)	0.368	0.370	0.391
Depleted fraction (Available)	0.371	0.383	0.404
Process fraction (Depleted)	0.270	0.282	0.320
Process fraction (Available)	0.105	0.110	0.130

Table 3 Water accounting at different parts of Sedone River (current irrigation)

Water accounting components	Upper Sedone (MCM)	Middle Sedone (MCM)	Lower Sedone (MCM)
Gross inflow			
Precipitation	2,181.32	10,705.33	15,598.13
Net inflow	2,181.32	10,705.33	15,598.13
Depletive use			
Process depletion			
Evapotranspiration	102.12	986.89	1,627.46
Non-process depletion			
Beneficial (Forest evaporation)	877.64	3,252.46	4,148.93
Total depletion	979.76	4,239.35	5,776.39
Outflow			
Committed water	40.00	350.00	500.00
Uncommitted outflow	1,160.10	6,110.90	9,309.60
Total outflow	1,200.10	6,460.90	9,809.60
Available water	2,141.32	10,355.33	15,098.13
Indicator			
Depleted fraction (gross)	0.449	0.396	0.370
Depleted fraction (net)	0.449	0.396	0.370
Depleted fraction (Available)	0.458	0.409	0.383
Process fraction (Depleted)	0.104	0.233	0.282
Process fraction (Available)	0.048	0.095	0.110

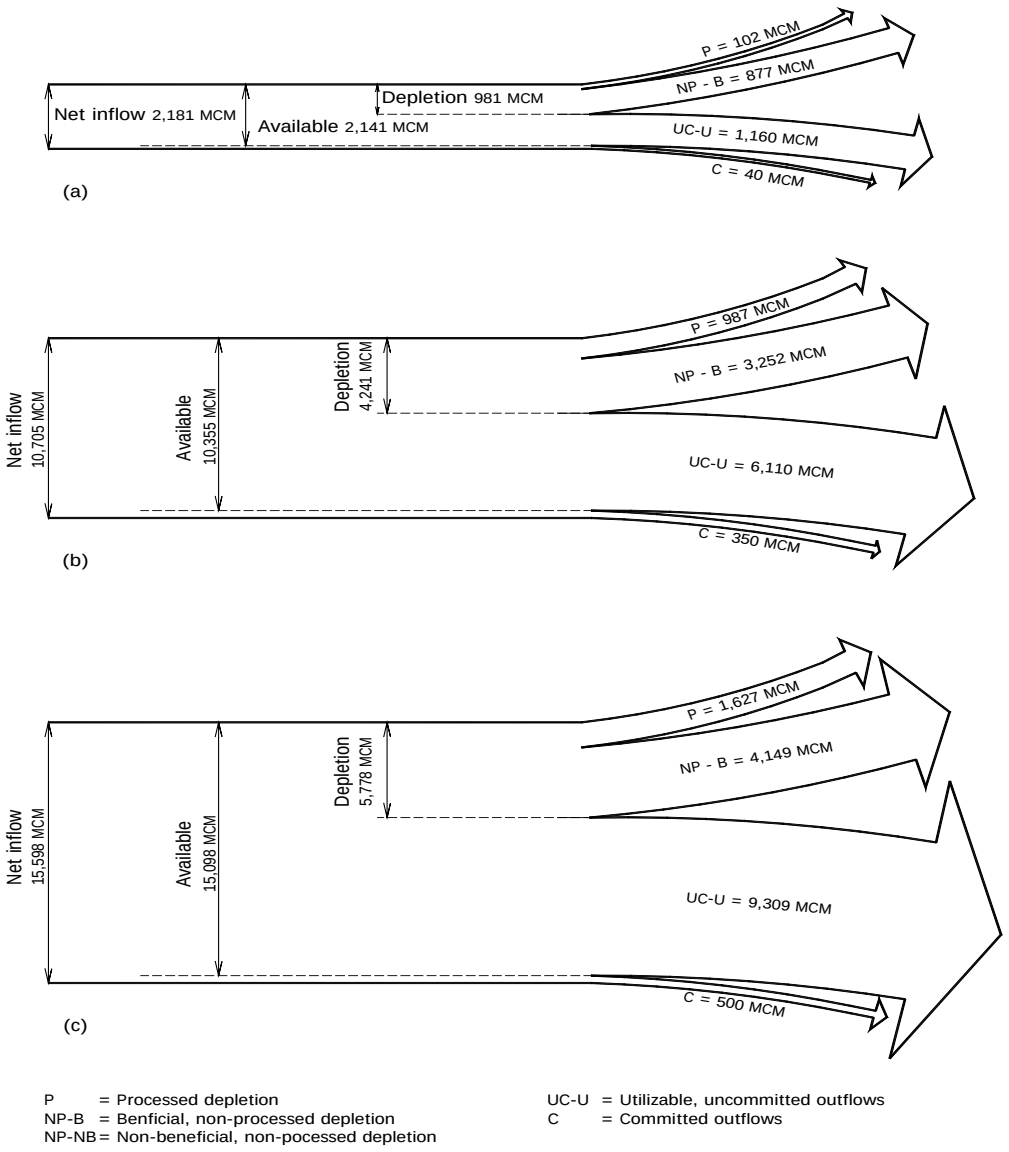

Figure 10 Water accounting in Sedone River Basin (current irrigation) (a) Upper Sedone (b) Middle Sedone (c) Lower Sedone

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้ ได้ประยุกต์ใช้ผลจากแบบจำลอง SWAT ในการวิเคราะห์บัญชีน้ำของลุ่มน้ำเซโดน สปป ลาว โดยใช้ข้อมูล 10 ปีระหว่างปี ค.ศ. 2001 ถึงปี ค.ศ. 2010 จากการจำลอง โดยทำการสรุปผลตามหลักการของสมดุลน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย และนำผลไปทำการวิเคราะห์บัญชีน้ำรายปีของลุ่มน้ำ

แบบจำลอง SWAT สามารถแยกองค์ประกอบต่างๆ ของสมดุลน้ำในแต่ละลุ่มน้ำย่อยได้ละเอียดถึงระดับ HRUs ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณน้ำเข้าพื้นที่ลุ่มน้ำ ปริมาณน้ำที่สูญหายไปจากการใช้น้ำของพืช และปริมาณน้ำที่ไหลออกจากลุ่มน้ำ ผลการจำลองในแต่ละกรณีพิจารณาที่ได้จากการประเมินด้วยแบบจำลอง สามารถที่จะวิเคราะห์บัญชีน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำได้

จากผลการวิเคราะห์บัญชีน้ำ สรุปได้ว่าพื้นที่ลุ่มน้ำเซโดนมีปริมาณน้ำไหลเข้าพื้นที่ทั้งหมด 15,600 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี ปริมาณน้ำที่สูญหายไปคิดเป็น 37% ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกคิดเป็น 63% เทียบกับปริมาณน้ำไหลเข้าพื้นที่ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่ายังมีการใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ยังมีน้อยอยู่ ผลจากการวิเคราะห์บัญชีลุ่มน้ำพบว่า

ปัจจุบันลุ่มน้ำเซโดนอยู่ในสถานะเปิด (an open basin) กล่าวคือ มีทรัพยากรน้ำเหลือสำหรับการใช้น้ำที่เพิ่มได้อีก

แบบจำลอง SWAT ที่ใช้ร่วมกับข้อมูลระบบสานเทศภูมิศาสตร์ ช่วยให้การแสดงผลลัพธ์ทางกายภาพของลุ่มน้ำได้อย่างชัดเจน และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่แบบจำลอง SWAT ยังมีข้อจำกัดในด้านการสรุปผล โดยแบบจำลองประเมินองค์ประกอบต่าง ๆ ของปริมาณน้ำเป็นรายวัน แต่การสรุปผลลัพธ์ของ HRUs เป็นข้อมูลแบบเฉลี่ยรายปี ดังนั้น จึงมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์บัญชี แบบรายเดือน และแบบรายฤดูกาลของลุ่มน้ำเซโดน

การกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง SWAT ในการสร้างหน่วยการตอบสนองทางอุทกวิทยา HRUs ที่มีความละเอียดมากจะทำให้แบบจำลองคำนวณใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงของลุ่มน้ำ และยังเป็นส่วนสำคัญที่จะใช้วิเคราะห์พื้นที่ที่มีการใช้น้ำชลประทานของลุ่มน้ำ

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณมายัง ศูนย์นานาชาติสิรินธรเพื่อการพัฒนาการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาสนับสนุนทุนสำหรับการศึกษานี้ และข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งและขอบคุณถึงทีมงานที่พัฒนาแบบจำลอง SWAT นี้เป็นอย่างสูงที่ได้นำเสนอเครื่องมือต่อการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. 2009. ยุทธศาสตร์การพัฒนาโครงร่างชลประทาน 2006-2010. กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรกรรม และป่าไม้. เวียงจันท์, สปป ลาว.

ไชยวัฒน์ เจริญจิระตระกูล. 2548. การวิเคราะห์บัญชีน้ำในโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ไชยวัฒน์ เจริญจิระตระกูล และ เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย. 2548. การวิเคราะห์บัญชีน้ำของโครงการชลประทานพลเทพ. ใน: การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43 เล่ม 2 สาขาวิศวกรรมศาสตร์, 14 กุมภาพันธ์ 2548. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. น. 22-29.

สุวิทย์ อ๋องสมหวัง และ สุภักดิ์ กุลโท. 2556. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อผลปริมาณน้ำท่า กรณีศึกษาลุ่มน้ำย่อยห้วยตุงลุงในลุ่มน้ำมูล.ม. 1-7. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกล และสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย. ปีที่ 14. ฉบับที่ 1.

วิศิษฏ์ เกษรมาลา, เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย, และ เจษฎา แก้วกัลยา. 2552. สมรรถภาพการบริหารจัดการน้ำของกลุ่มผู้ใช้น้ำในโครงการส่งน้ำ และบำรุงรักษาเพชรบุรี. วิทยาสารกำแพงแสน. 7(3): 66-79.

วิโรจน์ กิมาลา และ เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย. 2555. การประเมินปริมาณการไหลในพื้นที่ลุ่มน้ำเซโดน สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว.การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17, ณ โรงแรม เซ็นทารา แกรนด์แอนคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ อุดรธานี.

วิโรจน์ กิมาลา และ เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย. 2556. การวิเคราะห์บัญชีน้ำของลุ่มน้ำเซโดน สปป.ลาว. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18, ณ โรงแรมดิเอ็มเพลสเชียงใหม่.

เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย และ บัญชา ขวัญยืน. 2545. การจัดทำบัญชีน้ำในลุ่มน้ำแม่น้ำแม่กลอง. วิศวกรรมสาร มก. 46: 122 - 133.

Arnold, J.G. and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modeling. Hydrol. Process. 19(3): 563-572.

Ayana, A.B., D.C. Edossa and E. Kositsakulchai. 2012. Simulation of Sediment Yield using SWAT Model in Fincha Watershed, Ethiopia. Kasetsart J. 46(2): 283 – 297.

Behera, S. and R.K. Panda. 2006. Evaluations of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process model. Agric. Ecosyst. Environ. 113(1-4): 62-72.

Gassman, P.W., M.R. Reyes and C.H. Green. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and the future research directions. Trans. ASABE. 50(4): 1211–1250.

Hoanh, C.T., J.R.Y. Kittipong, L.C.B. Guillaume and S.R. Vithet. 2010. Impacts of climate change and development on Mekong flow regime. First assessment - 2009. MRC Technical Paper No. 29. Mekong River Commission, Vientiane, Lao PDR.

Molden, D.1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute (IIMI), Colombo.

Molden, D., R. Sakthivadivel and Z. Habib. 2000. Basin level use and productivity of water, Examples from South Asia. IWMI Research Report 49. International Water Management Institute (IWMI), Colombo.

Peranginangin N., R. Sakthivadivel, N.R. Scott, E. Kendy and T.S. Steenhuis. 2003. Water accounting for conjunctive groundwater/surface water management: case of the Singkarak-Ombilin River basin, Indonesia. J. Hydrol. 205: 1 – 22

Shilpaker, R.L. 2003. Geo-information Procedures for Water Accounting: A Case of The East Rapti River Basin, Nepal. M.S. Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Netherlands.

Taesombut, V., K. Pongput, S. Aekaraj, S. Kaysavawng and E. Biltonen. 2002. Regional Study on the Development of Effective Water Management Institutions: A Case Study of the Bang Pakong River Basin, Thailand Research Fund (TRF), Bangkok.

Viloth, K. and E. Kositsakulchai. 2012. Estimation of Streamflow by SWAT Model in Sedone River Basin, LAO PDR. International Conference Challenges of Water & Environmental Management in Monsoon Asia, Thailand.

Received 28 August 2013

Accepted 20 December 2013